Transports Canada
Développement

Transport Canada
Development

TP 5681F

ARCTIC: Tenue de la coque aux charges des glaces

Rapport sommaire

Préparé pour le
Centre de développement
des transports

Transports Canada

FÉVRIER 1985

CA1
DTC 820
85
A67S
c.2

Canada

TP 5681F

ARCTIC: TENUE DE LA COQUE AUX CHARGES DES GLACES

RAPPORT SOMMAIRE

Library and Information Centre / Centre de Documentation (GSLA)
RECEIVED - REÇU LE
OCT 30 1985
Transport Canada / Transports Canada

I. Glen
A.M. Nawwar
R. Brown

Préparé pour le

Centre de développement des transports

par

Arctec Canada Limited

Février 1985

Le contenu du présent rapport ne réflète que les opinions des auteurs et ne saurait en aucun cas engager les politiques et positions officielles du Centre de développement des transports, Transports Canada.

Also available in English under the title: "M.V. Arctic Structural Performance", TP 5681E.

ÉQUIPE DE RECHERCHE

L'équipe de recherche mise sur pied par Arctec Canada Limited était composée de:

I.F. Glen
A.M. Nawwar
R. Brown
A. Karton
G. Tam

PRÉFACE

L'ARCTIC, minéralier de cote arctique 2, a été équipé d'une chaîne de mesure qui a permis d'amasser des données sur la réponse de la coque aux charges des glaces durant ses divers périples dans les eaux arctiques canadiennes, de 1979 à 1981.

Ces données ont été dépouillées, réduites et analysées de manière à délivrer une information exploitable sur les performances du navire, et à permettre l'appréciation de la réglementation définissant les caractéristiques techniques essentielles du navire.

Le programme de recherche s'est déroulé en deux étapes. La première a été d'apprécier la qualité des données et de mettre au point des méthodes d'analyse; la deuxième, de réduire ces données.

La recherche a porté sur l'analyse des valeurs de déformation observées à l'étrave, dont ont été tirées des valeurs de charge et de pression des glaces, classées selon les conditions glacielles et les paramètres de fonctionnement du navire.

L'ensemble des observations, ajoutées aux connaissances déjà acquises dans le domaine considéré, aura contribué à une meilleure compréhension des phénomènes en jeu et à l'identification des secteurs où des perfectionnements sont possibles.

FORMULE DE DOCUMENTATION POUR RAPPORT

1	N° du rapport Transports Canada	2	N° de l'étude — CDT	3	N° de catalogue du destinataire
	TP 5681F		4823		

4	Titre et sous-titre	5	Date du rapport
	ARCTIC: Tenue de la coque aux charges des glaces		Février 1985
		6	N° du rapport de l'organisme exécutant FR1500C

7	Auteur(s)	8	N° de dossier Transports Canada
	I.F. Glen, A. Nawwar, R. Brown		D 1460-166-37

9	Nom et adresse de l'organisme exécutant	10	N° de dossier — ASC
	Arctec Canada Limited 311 Legget Drive Kanata, Ontario K2K 1Z8		11SD T8200-3-3513
		11	N° de contrat — ASC ou Transports Canada OSD83-00172

12	Nom et adresse de l'organisme parrain	13	Genre de rapport et période visée
	Centre de développement des transports (CDT) Complexe Guy-Favreau, 200 o., boul. Dorchester Suite 601, tour ouest Montréal, Québec H2Z 1X4		Sommaire 1979-1981
		14	Code de l'organisme parrain CDT 4823

15	Remarques additionnelles	16	Agent de projet — CDT
			R. Bertrand

17 Résumé

Ce rapport concerne la réduction et l'analyse des données amassées grâce à la chaîne de mesure à bord de l'ARCTIC, durant les saisons de navigation de 1979 à 1981. Ce programme s'est déroulé en deux étapes; la première a permis d'apprécier la qualité des données et de mettre au point des méthodes d'analyse; la deuxième, de réduire ces données.

Les charges les plus sévères ont été constatées à l'égard d'une couverture de glace 10/10 constituée en partie de floes de plusieurs années; les niveaux enregistrés étant de trois à quatre fois supérieurs à ceux d'une marche continue dans une glace uniforme. Le nombre élevé de capteurs a permis de tracer des courbes d'isocontrainte à l'égard de diverses combinaisons d'interaction coque-glaces, mettant en évidence les zones soumises à des charges maximums ainsi que l'amplitude de ces charges. Plusieurs cas de déformation permanente ont été analysés, attribuables à des charges d'environ 23 MN (2 340 tonnes). La comparaison des valeurs de contrainte mesurées avec les valeurs de résistance stipulées dans la Loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques a montré que les risques de déformation permanente des plaques de bordé sont élevés, alors que les membrures semblent bénéficier d'une marge de sécurité suffisante.

Le rapport conclut que l'ensemble des observations, ajoutées aux connaissances déjà acquises dans le domaine considéré, auront contribué à une meilleure compréhension des phénomènes en jeu et à l'identification des secteurs où des perfectionnements sont possibles.

18	Mots-clés	19	Diffusion
	Navires arctiques, réponses de la coque, instrumentation, chaîne de mesure, analyse des données.		Le CDT dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

20	Classification de sécurité (de ce rapport)	21	Classification de sécurité (de cette page)	22	Nombre de pages	23	Prix
	restreinte		non classée		36		-

CDT TDC 79-005

REPORT DOCUMENTATION FORM

1. Transport Canada Report No.	2. TDC Project No.	3. Recipient's Catalogue No
TP 5681F	4823	

4. Title and Subtitle	5. Report Date
ARCTIC: Tenue de la coque aux charges des glaces	February 1985
	6. Performing Organization Report No FR1500C
7. Author(s) I.F. Glen, A. Nawwar, R. Brown	8. Transport Canada File No D 1460-166-37
9. Performing Organization Name and Address Arctec Canada Limited 311 Legget Drive Kanata, Ontario K2K 1Z8	10. DSS File No 11SD T8200-3-3513
	11. DSS or Transport Canada Contract No 0SD83-00172
12. Sponsoring Agency Name and Address Transportation Development Centre (TDC) Guy Favreau Complex, 200 Dorchester Blvd. W. Suite 601, West Tower Montreal, Quebec H2Z 1X4	13. Type of Report and Period Covered Summary 1979-1981
	14. Sponsoring Agency Code TDC 4823
15. Supplementary Notes	16. TDC Project Officer R. Bertrand

17. Abstract

Analysis of the structural response data collected onboard the MV ARCTIC during the 1979-1981 operating seasons is reported.

The project was conducted in two phases, the first being identification of quality data and development of analysis procedure; the second, reduction of the bulk of the data.

Worst loads were experienced while operating in up to 10/10th ice with multi-year floes present, being three to four times those experienced when operating in level ice. The large number of gauges permitted stress contours to be developed for each ship/ice interaction scenario, indicating areas of peak loading and their extent. Several cases of damage were also analyzed and loads up to 23 MN (2340 tonnes) estimated as the cause. Analysis of measured stresses in relation to Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations indicated that plates are subject to a high probability of permanent damage, while main frames appeared to have an adequate safety margin.

It is considered that the data collected, when combined with other technology in the field, has contributed to an understanding of the structural response of the vessel in ice and identified areas for future improvement.

18. Key Words	19. Distribution Statement
Arctic vessels; Ship structure in ice; Instrumentation, Data collection and analysis.	Limited number of copies available from TDC.

20. Security Classification (of this report)	21. Security Classification (of this page)	22. No. of Pages	23. Price
Restricted	Unclassified	36	-

TDC CDT 79 005

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION	1
2.	RÉDUCTION ET ANALYSE DES DONNÉES	3
	2.1 Classement des données	3
	2.2 Réduction des données	4
	2.3 Rappel des données réduites	4
3.	CHARGE ET PRESSION DES GLACES	6
4.	DÉFORMATIONS	9
5.	DISTRIBUTION DES CONTRAINTES ET DES DÉFORMATIONS	11
6.	DÉPASSEMENT DE LA LIMITE D'ÉLASTICITÉ	14
7.	APPRÉCIATION DE LA RÉGLEMENTATION APPLICABLE	16
8.	APPRÉCIATION DE LA CHAÎNE DE MESURE	19
9.	CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS	21
10.	RÉFÉRENCES	26

LISTE DES FIGURES ET TABLEAU

Figure 1	Emplacement du panneau instrumenté et de l'élément de surface	6
Figure 2	Valeurs limites des taux de déformation	10
Figure 3	Courbes d'isocontrainte	11
Figure 4a	Zones d'impact à l'avant. Cas observés de dépassement de la limite d'élasticité	15
Figure 4b	Reconstitution de la collision avec un floe de plusieurs années (cas 3)	15
Figure 5a	Distribution des valeurs extrêmes de contrainte dans les plaques de bordé	18
Figure 5b	Distribution des valeurs extrêmes de contrainte dans les membrures	18
Tableau 1	Rappel des rubans dépouillés	5

1. INTRODUCTION

L'ARCTIC est le premier cargo brise-glace de cote arctique 2 à satisfaire aux dispositions de la Loi sur la prévention de la pollution des eaux arctiques. Mis en service en 1978, il assure des liaisons entre divers ports arctiques, et permet aussi la collecte de données sur les conditions de navigation dans les glaces grâce à la chaîne de mesure dont il a été équipé, depuis. Cette information, recueillie au cours des saisons de navigation de 1979, 1980 et 1981 a été classée, réduite et enfin stockée dans une base de données où se retrouve l'essentiel de plusieurs périples dans l'Arctique et de quatre périples d'essais spécialisés.

Le mandat de la présente étude a été:

1) de procéder à l'appréciation de la réglementation contenue dans la Loi susmentionnée concernant les caractéristiques essentielles d'un navire de cote 2, et de fournir les outils nécessaires pour l'évaluation tant quantitative que qualitative des normes concernant les autres classes de navire brise-glace visées par la Loi. C'était la partie essentielle du mandat;

2) de procéder à l'appréciation des prescriptions concernant les zones et les périodes de navigation admissibles pour un navire de cote 2;

3) d'élaborer une base d'étude à partir de laquelle les connaissances acquises en matière de navigation dans les glaces, et de navigation maritime commerciale, pourraient être élargies, enrichies et diffusées.

Le programme de recherche a été divisé en deux étapes. La première a été d'apprécier la qualité et la quantité des données réellement utiles, de mettre au point des méthodes pour la réduction et l'analyse de ces données, et enfin de déterminer la présentation à leur donner qui convienne le mieux à l'utilisation qu'on entend en faire.

Quant à la deuxième étape, elle a été consacrée systématiquement à la réduction et à l'analyse des données visées, selon les catégories retenues, dans le but de déterminer:

- les courbes de distribution des charges et des pressions dues aux glaces et s'exerçant sur la partie instrumentée du navire;
- les modes de rupture des glaces;
- les évènements ayant causé un dépassement de la limite d'élasticité des matériaux, voire leur ruine.

En outre, il a été demandé de faire l'appréciation technique des dispositions de l'annexe VI de la Loi.

Enfin, il a été procédé à l'appréciation de la chaîne de mesure à bord de l'ARCTIC, ainsi que des méthodes mises en oeuvre, les conclusions devant servir à la mise au point des techniques d'instrumentation envisagées pour l'avenir.

2. RÉDUCTION ET ANALYSE DES DONNÉES

2.1 Classement des données

L'analyse des données a été faite d'après le comportement dynamique de l'ARCTIC dans les glaces, et une fois qu'elles ont été classées dans l'une des grandes catégories suivantes, selon l'appréciation des facteurs arctiques caractérisant la réponse de la coque à l'action des glaces.

Catégories générales	Priorité
Essais spécialisés	1
Marche continue dans les glaces	1
Facteurs primaires de caractérisation	
Charge des crêtes	1
Charge de floes de plusieurs années, couverture 10/10 ou moins, forte épaisseur	1
Marche continue dans des glaces uniformes de première année	2
Marche continue dans des floes de première année, couverture 10/10	3
Giration dans une glace uniforme	4
Marche en eau libre de glaces	1
Facteurs secondaires de caractérisation	
Conditions glacielles pleinement définies et entièrement enregistrées	1
Couverture de glace - bonnes conditions d'observation	2
Glace pourrie recouverte de neige, conditions d'observation médiocres	3
Eau libre	4
Facteurs tertiaires de caractérisation	
Marche en charge, sans différence d'assiette, système à bulles d'air arrêté	1
Marche sur lest, systèmes à bulles d'air arrêté	2
Système à bulles d'air en marche	3

2.2 Réduction des données

La chaîne de réduction et d'analyse des données comportait un dérouleur de bande 9 pistes piloté par un micro-ordinateur Apple IIe pour alimenter un ordinateur HP9816. Celui-ci effectuait en temps réel le traitement des données et le stockage sélectif de celles-ci sur une unité de disque Winchester grande capacité, ainsi que sur ses deux propres unités à disquettes. Aux matériels périphériques habituels ont été ajoutées une table infographique HP7470A et une imprimante par matrice de points. Cette chaîne constituait un bon choix de matériels acceptables des points de vue de la facilité d'usage, du coût et de l'efficacité dans le traitement de grandes quantités de données brutes.

2.3 Rappel des données réduites

Il y a eu en tout 73,8 heures d'enregistrement à dépouiller et à réduire. Leur répartition par catégorie de dépouillement apparaît au tableau 1.

Le choix des rubans magnétiques s'est fait d'après l'abondance et la qualité des données enregistrées. Il fallait notamment: que soient connus les paramètres concernant l'épaisseur des glaces, l'assiette du navire, la vitesse d'impact, la durée de l'essai; que la fréquence d'échantillonnage ait été d'au moins 1 Hz; que l'on dispose, à l'égard des cas de contrainte/déformation élevés, de toutes les informations nécessaires sur les conditions glacielles et les autres paramètres de fonctionnement; et enfin que la chaîne de mesure ait fonctionné en mode continu.

Au cours de la première partie de l'étude, les dérives de zéro ont été corrigées, de même qu'ont été vérifiés et examinés les facteurs de conversion et de correction, les numéros et l'emplacement des capteurs extensométriques et des canaux de transmission correspondants et, enfin, les méthodes de réduction et d'analyse des données. Les résultats de ces vérifications et la comparaison des observations avec celles résultant d'études antérieures sur des brise-glace ont permis d'affirmer que la méthode de réduction et d'analyse adoptée a pu fournir une base de données raisonnablement valide.

Tableau 1
Rappel des rubans dépouillés

Catégorie	Nombre d'heures d'enregistrement	Nombre de rubans		
		Total	Essais spécia-lisés	Périples arctiques
Charge des glaces (marche alternée)	17,65	15	7	8
Marche continue - glace nouvelle et floes de plusieurs années	18,50	12	2	10
Marche continue - glace nouvelle	18,75	14	9	5
Glace fragmentée	9,42	6	1	5
Giration dans une glace nouvelle	4,57	11	11	-
Eau libre	4,67	2	-	2
Divers	0,15	1	-	1
TOTAL	73,80	61	30	31

3. CHARGE ET PRESSION DES GLACES

La charge des glaces a été déterminée à partir des déformations mesurées sur la surface d'un panneau instrumenté délimité par les membrures 179 à 189 et par les serres 3 à 6, comportant 28 capteurs disposés en réseau à peu près régulier sur les membrures. Un algorithme a été élaboré (1) permettant de calculer la charge totale à partir des valeurs maximums enregistrées. La charge a été calculée pour les valeurs de déformation maximum supérieures ou égales à 100, correspondant à une contrainte supérieure ou égale à 20 MPa, ces déformations ne devant pas être négatives.

La pression des glaces a été déterminée de deux manières: 1° en divisant les charges observées par la surface moyenne impactée (1,50 m²), et 2° par l'observation d'un élément de surface relié à quatre capteurs extensométriques et correspondant à la moitié de l'espace entre deux membrures et tout l'espace entre deux serres, figure 1. Mais c'est la première de ces deux déterminations qui a donné la meilleure précision.

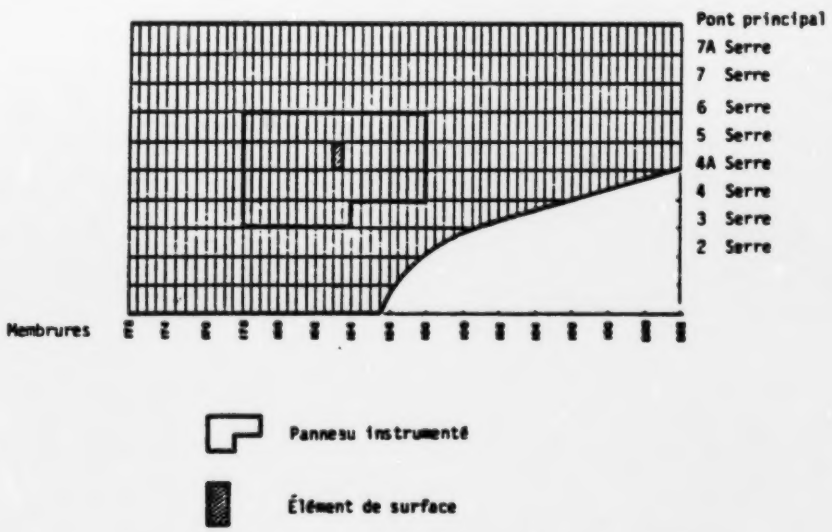


Figure 1 Emplacement du panneau instrumenté et de l'élément de surface

À l'égard de chacune des catégories considérées, les valeurs de charge obtenues par calcul ont été portées sur graphiques en fonction des valeurs mesurées de vitesse à l'impact et d'épaisseur des glaces.

Aucune corrélation évidente n'a été constatée entre charges et vitesses, ni entre les premières et l'épaisseur des glaces. Par contre, l'analyse statistique a mené aux constatations suivantes:

- à tous les niveaux de probabilité, c'est la marche continue dans des glaces uniformes qui fait ressortir les charges de glace les plus faibles, la pression maximum correspondante étant de l'ordre de 5 MPa;

- pour un niveau de probabilité de 0,98, le classement des valeurs de pression par ordre décroissant a été le suivant, le cas 5 étant pris comme base de référence:

1. Floes de plusieurs années	6,1 MPa (2,4 fois la valeur de référence)
2. Glace fragmentée	5 MPa (2 fois)
3. Marche alternée	4,1 MPa (1,6 fois)
4. Giration dans une glace uniforme	3,4 MPa (1,4 fois)
5. Marche dans une glace uniforme	2,5 MPa (1 fois)

- les impacts les plus sévères résultent des heurts contre des floes de plusieurs années;

- la fréquence des impacts a été établie approximativement comme suit:

1. Floes de plusieurs années	28 impacts par heure
2. Glace fragmentée	16 impacts par heure
3. Marche alternée	35 impacts par heure
4. Giration - glace uniforme	351 impacts par heure
5. Marche continue - glace uniforme	74 impacts par heure

- on constate que les fréquences les plus élevées correspondent à une marche continue dans une glace uniforme, la fréquence augmentant considérablement en manoeuvre de giration;

- Le report graphique des valeurs de pression extrêmes a été fait selon deux équations de distribution très différentes et il a été montré que les extrapolations des pressions extrêmes variaient considérablement selon l'équation utilisée. L'insuffisance des données n'a pas permis de déterminer laquelle était la plus juste.

- la marche alternée a été la moins bien définie par la présente analyse, probablement à cause de l'emplacement même du panneau instrumenté.

Les valeurs de pression délivrées par l'élément de surface sont inférieures aux valeurs correspondantes délivrées par le panneau instrumenté, probablement en raison du manque d'étalonnage préalable et aussi de l'effet de "pontage" dû à un même morceau de glace impactant deux membrures voisines en même temps. De plus, on dirait qu'une rupture localisée a peu à voir avec le mode généralisé de rupture de la couverture de glace. D'où la grande dispersion des observations, attribuable aux variations dans les caractéristiques localisées de la glace.

4. DÉFORMATIONS

L'information sur les taux et la durée des déformations est tirée des signaux extensométriques échantillonnés à 100 et à 500 Hz.

Les trois paramètres pris en compte dans l'analyse des déformations ont été la durée, le taux et la valeur maximum.

La présentation des résultats a été double:

- comparaison des enregistrements en mode discontinu (valeurs maximums uniquement) et des enregistrements en temps réel;

- graphiques mettant en rapport, pour toutes les catégories considérées:

  . taux de déformation et déformation maximum
  . taux de déformation et durée du signal enregistré
  . histogramme des taux de déformation

  et ce, à l'égard aussi bien des plaques de bordé que des membrures, figure 2.

Les taux de déformation les plus élevés ont été observés en marche continue dans une glace uniforme, où prédomine la rupture par flexion. En marches alternées et dans les collisions avec des floes de plusieurs années, les taux sont du même ordre. Il se peut que la rupture se fasse surtout par écrasement.

Si les taux de déformation sont légèrement plus élevés sur les membrures que sur le bordé en marches alternées et dans les collisions avec des floes de plusieurs années, cette tendance est inversée en marche continue dans une glace uniforme, probablement à cause de l'effet de "pontage" qui "déleste" le bordé, le gros de l'effort étant absorbé par les membrures.

Les graphiques de la figure 2 montrent que les valeurs maximums des taux de déformation sont une fonction linéaire des déformations maximums elles-mêmes, mettant en évidence le rapport direct qu'il y aurait dans les interactions dynamiques de la coque et des glaces. Le taux de déformation maximum enregistré au cours du programme de saisie des données concernant l'ARCTIC a été de l'ordre de $10^{-2}s^{-1}$.

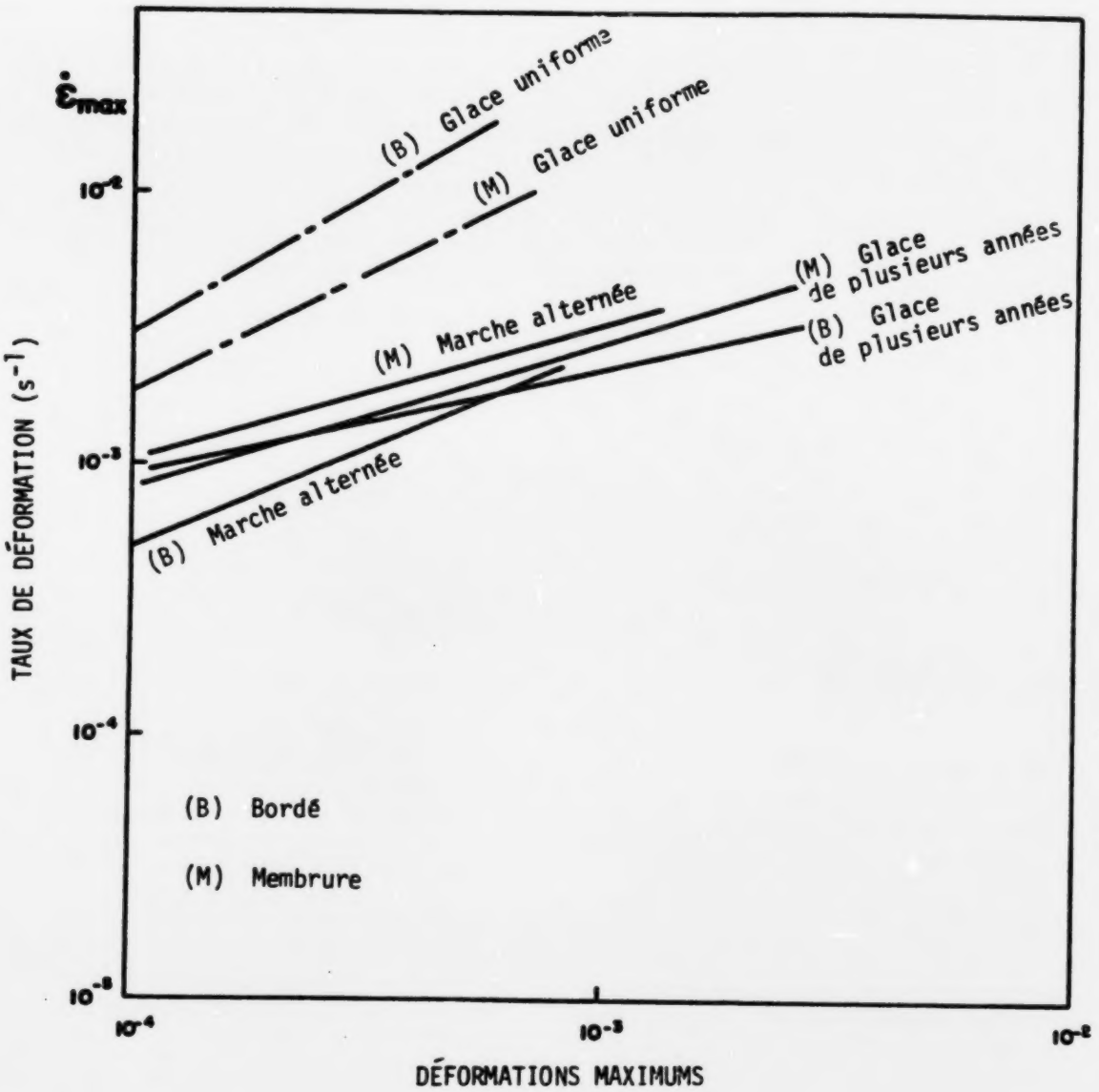


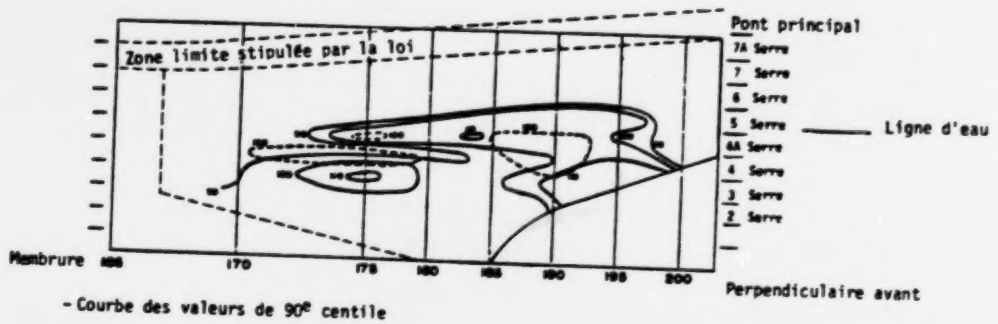
Figure 2 Valeurs limites des taux de déformation

5. DISTRIBUTION DES CONTRAINTES ET DES DÉFORMATIONS

La distribution des charges exercées par les glaces sur la coque, à différents niveaux d'interaction dynamique, a été déterminée à partir de l'analyse statistique des données délivrées par chacun des capteurs extensométriques. Ces données ont été tirées des histogrammes établis pour chacun d'eux, les valeurs retenues correspondant au 90e centile des valeurs observées, niveau représentant des valeurs de déformation jugées valides pour les besoins de la comparaison.

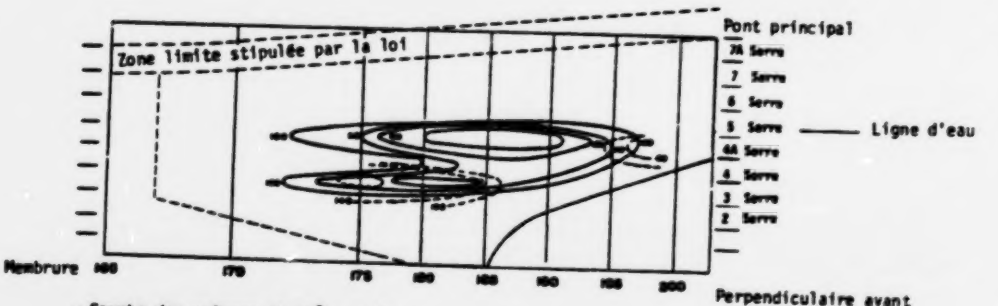
Des courbes de contraintes maximums à différentes lignes d'eau ont pu être tracées, ainsi que les courbes d'isocontrainte tirées des premières et exigeant certains artifices de calcul, figure 3.

a) Marches alternées



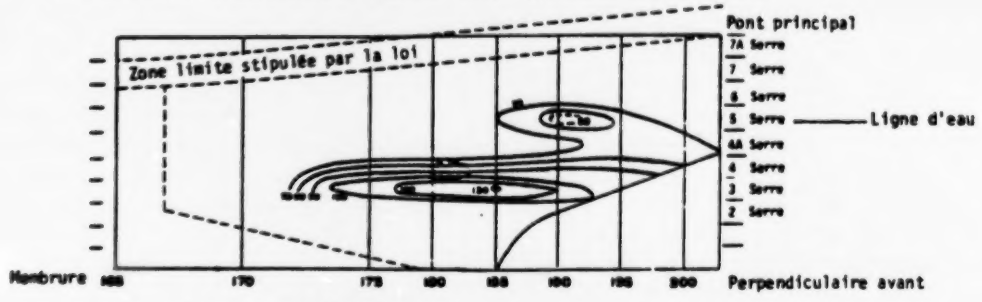
- Courbe des valeurs de 90e centile

b) Marche dans les floes de plusieurs années



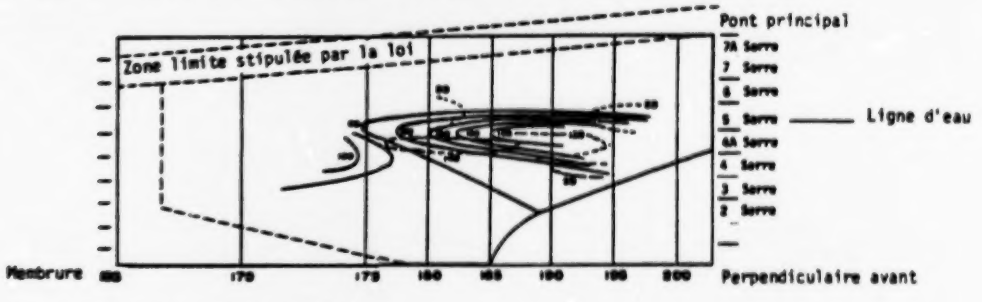
- Courbe des valeurs de 90e centile

c) Marche continue dans une glace uniforme



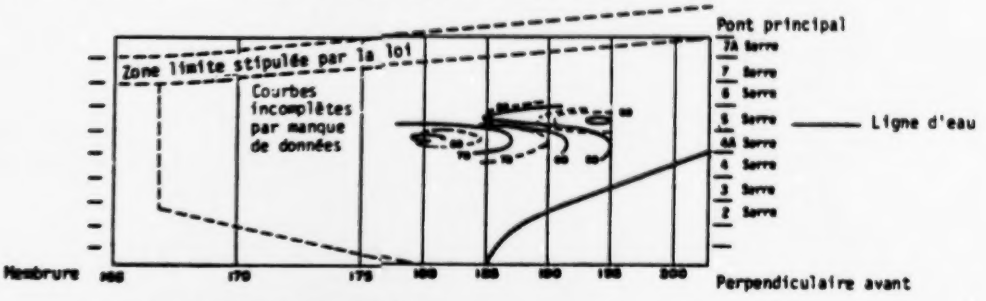
- Courbe des valeurs de 90^{e} centile

d) Marche dans le sillage d'un brise-glace



- Courbe des valeurs de 90^{e} centile

e) Giration dans une glace uniforme



- Courbe des valeurs de 90^{e} centile

Figure 3 Courbes d'isocontrainte

Ce procédé de présentation unique, rendu possible grâce au nombre élevé de capteurs dans le réseau extensométrique, met en évidence des tendances qui trouvent confirmation dans les réactions dynamiques constatées à l'égard de chacun des modes d'évolution retenus, autorisant les observations suivantes:

- Les contraintes maximums sur les membrures restent à peu près égales, quelle que soit l'allure, sans dépasser les 140 MPa, soit 60 p. 100 de la limite d'élasticité. Quant aux contraintes maximums sur le bordé, elles sont légèrement supérieures aux valeurs correspondantes sur les membrures.

- Les contraintes maximums sur les membrures et sur le bordé ne coïncident ni quant à leur emplacement ni quant à leur distribution, indiquant des différences dans la réponse et la réaction aux variations dans les interactions dynamiques. En effet, les membrures réagissent plus que le bordé aux charges agissant sur des grandes surfaces, en raison du phénomène de pontage qui "déleste" les tôles de bordé.

- La zone de renforcement de la coque, précisée dans la Loi susmentionnée, coïncide bien avec celle où les risques de surcharge sont les plus élevés.

- Les contraintes maximums ne concentrent au droit et légèrement à l'avant de la membrure 185, justifiant ainsi le choix de la zone 1 (entre les cloisons 178 et 188) pour l'implantation du panneau instrumenté, bien que l'extension de celui-ci vers l'étrave aurait pu donner des résultats intéressants.

6. DÉPASSEMENT DE LA LIMITE D'ÉLASTICITÉ

Quelques cas de défaillance structurelle ont été étudiés dans le but de déterminer les conditions ayant entraîné le dépassement de la limite élastique.

La figure 4 montre l'emplacement des zones impactées où la limite élastique a été dépassée.

Au cas 2, on remarque que l'emplacement de la déformation indiquée par les données enregistrées et celui de l'avarie ne coïncident pas, signe que l'avarie est antérieure à la déformation enregistrée, et qu'elle a probablement eu lieu à un moment où on n'enregistrait pas. L'écrouissage qui en a résulté a fait que même des efforts correspondant à des déformations de l'ordre de 1 700 micromètres par mètre n'ont provoqué aucune déformation permanente.

Quant au cas 3, collision avec un floe de plusieurs années, on constate que celle-ci a intéressé deux surfaces nettement séparées l'une de l'autre, le navire étant alors en charge et avançant continûment dans une glace uniforme à la vitesse de 6 noeuds. La reconstitution de la collision a montré que la charge maximum à l'arrière a été de 14,45 MN (1 473 tonnes), tandis qu'à l'avant elle a été estimée à quelque 19 MN du fait que les valeurs de déformation enregistrées étaient plus fortes.

Concernant un autre incident, cas 4, relié à une collision avec un floe de plusieurs années alors que la vitesse était de 7 noeuds, les valeurs estimées de charge et de pression ont été les suivantes:

- 17 MN (1 730 tonnes)	Membrure 180/181 à la ligne d'eau
- 23 MN (2 340 tonnes)	Membrure 183 à la ligne d'eau
- 3,7 à 5,9 MPa, pression sur l'élément de surface	Membrure 181-181½ et serre 4-4A

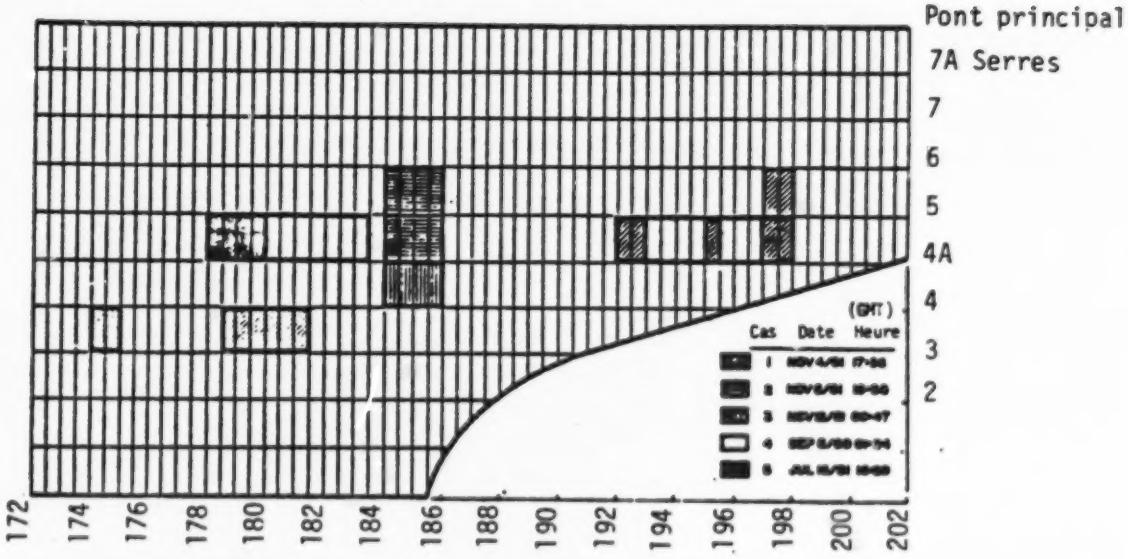


Figure 4a Zone d'impact à l'avant. Cas observés de dépassement de la limite d'élasticité

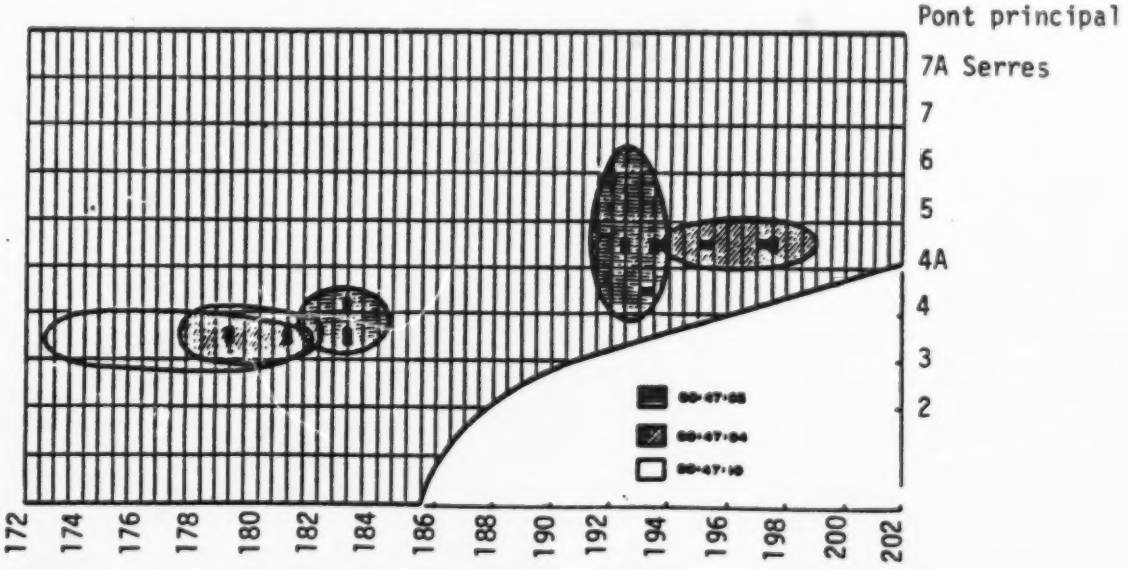


Figure 4b Reconstitution de la collision avec un floe de plusieurs années (cas 3)

7. APPRÉCIATION DE LA RÉGLEMENTATION APPLICABLE

L'ARCTIC répond aux dispositions de la Loi concernant un navire de cote arctique 2. L'annexe VI stipule, en effet, que les plaques du bordé et les membrures principales doivent pouvoir supporter la pression prévue de 4,14 MPa (600 lb/po^2) sans que leur limite d'élasticité soit dépassée. La comparaison des valeurs délivrées par le panneau instrumenté et par l'élément de surface montre qu'il existe un phénomène de pontage qui produit un "délestage" localisé des plaques de bordé lorsque les glaces sont de grandes dimensions, que la pression due à l'impact n'est pas uniformément répartie et aussi qu'elle présente une valeur localement très élevée.

Le calcul des membrures selon les dispositions de cette Loi tient la charge pour uniforme sur une distance verticale de 800 mm. En l'absence d'information plus précise, cette distance paraît bien fondée. Par contre, l'hypothèse que la charge, elle, est uniforme ne l'est pas. Ceci dit, rappelons que la valeur de 4,14 MPa (600 lb/po^2) donnée par le tableau 2 de la Loi comme étant (à ± 50 p. 100 près selon la référence 1) la pression à absorber sans déformation permanente, représente une pression uniformément répartie. La résistance nominale des serres à la glace, donnée par le tableau 3 de l'annexe F, est de 0,81 MPa, valeur qui manifestement devrait être ajustée en fonction de la charge et de la surface touchée. Des pressions maximums supérieures à 8,2 MPa ont été effectivement observées.

L'épaisseur des plaques de bordé stipulée par la Loi semble être fondée soit sur la théorie des poutres qui dit que la ruine se fait par formation de trois charnières plastiques dans le cas d'une plaque à bords fixes soumise à une charge uniformément répartie, le coefficient de sécurité pris en compte étant de 1,5 (d'après Nawwar, réf. 2), soit un calcul sans coefficient de sécurité dans le cas d'une plaque simplement appuyée. Le mécanisme de ruine d'une plaque par formation de charnières plastiques suppose une charge supérieure à la limite élastique, et il peut être démontré que le niveau de contrainte correspondant est de l'ordre de 1,8 σ_y. Pour cette raison, les pressions mesurées ont été portées sur graphique montrant à la fois σ_y et 1,8 σ_y.

Pour apprécier adéquatement la réglementation applicable, on s'est servi de la méthode statistique des valeurs extrêmes, à l'égard des valeurs de déformation délivrées par les capteurs dont les réactions ont été les

plus fortes. Des exemples en sont donnés à la figure 5a et 5b pour différents modes de marche.

L'analyse statistique a montré que le risque de dépassement de la limite élastique dans les plaques de bordé varie selon l'emplacement et qu'il est plus grand avec les glaces de plusieurs années et les glaces fragmentées.

Pour les membrures, le risque varie beaucoup selon l'emplacement et les réactions des glaces, mais il s'accroît davantage au cours des marches alternées ou des marches dans des glaces fragmentées ou de plusieurs années.

Dans un intervalle de 2 minutes, il existe une probabilité de 3 p. 100 pour que le niveau de contrainte au droit d'un capteur dépasse la moitié de la limite d'élasticité.

On en conclut que les plaques de bordé n'ont pas une marge de sécurité suffisante contre les risques de ruine, et que la méthode de calcul prévue dans la Loi fait surgir une forte probabilité de déformation permanente. Par contre, les observations révèlent que les membrures courent un risque beaucoup moins grand que les plaques, et que les niveaux de résistance que leur confère la méthode de calcul prévue sont adéquats.

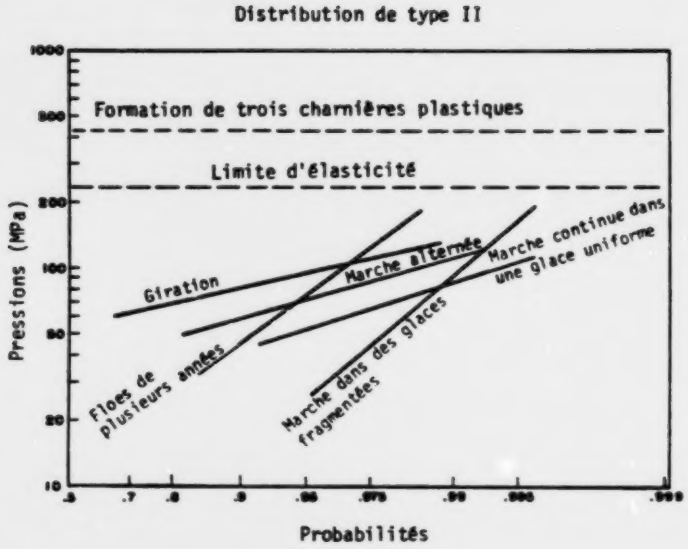


Figure 5a Distribution des valeurs extrêmes de contrainte dans les plaques de bordé (courbes enveloppes pour l'ensemble des plaques)

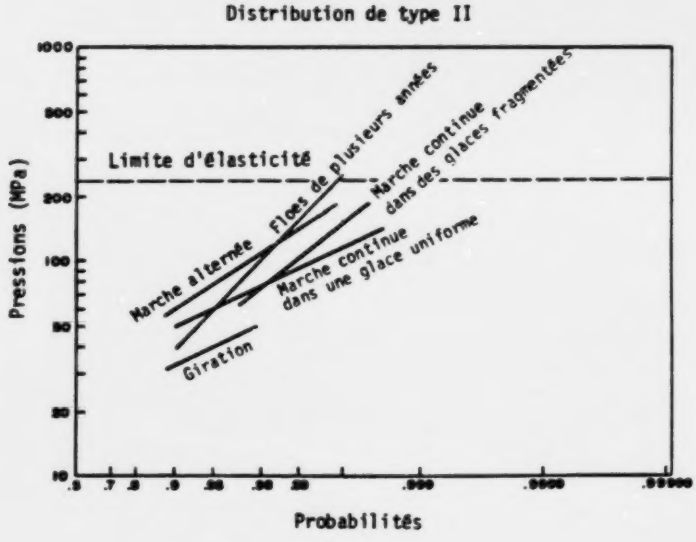


Figure 5b Distribution des valeurs extrêmes de contrainte dans les membrures (courbes enveloppes pour l'ensemble des membrures)

8. APPRÉCIATION DE LA CHAÎNE DE MESURE

On reconnaît maintenant les faiblesses inhérentes au système d'acquisition des données installé à bord de l'ARCTIC; ces faiblesses concernent tant le principe de base que la sélection et l'installation du matériel et de ses composants. Le but de cette recherche a donc été de déceler les lacunes de la chaîne, responsables de la piètre performance constatée au point de vue qualitatif et quantitatif, et de faire les recommandations nécessaires pour l'avenir.

L'endroit choisi pour l'implantation du panneau instrumenté a été généralement bon, étant donné qu'il coïncidait avec la surface la plus exposée aux impacts. Par contre, des capteurs placés au droit de l'étrave auraient pu donner des résultats intéressants sur les contraintes maximums à l'occasion des marches alternées.

La trame des capteurs dans la partie instrumentée était assez régulière, mais la surface de chaque maille était trop grande par rapport aux surfaces d'impacts, réduisant ainsi la qualité des résultats.

Une trame régulière comportant de préférence des capteurs double qui ajoutent à la fiabilité est un critère important, les capteurs devant être disposés de manière qu'à toute grandeur mesurée donnée, il ne puisse correspondre qu'un seul régime de charge. On choisit de préférence des capteurs pour la mesure de grandeurs de cisaillement, de compression, etc., plutôt que des grandeurs de flexion étant donné que ces dernières peuvent résulter non pas d'un, mais de plusieurs régimes de charge différents.

Or, il s'est avéré que la raison essentielle d'un réseau extensométrique n'a pas été comprise.

En effet, il ne sert à rien de poser des capteurs témoins séparés et isolés les uns des autres sur le côté bâbord puisqu'à toute grandeur mesurée peut correspondre plus d'un régime de charge possible.

L'endroit choisi pour l'implantation des capteurs doit permettre le mesurage des impacts provoqués par toutes les sortes de glaces rencontrées, et non pas seulement les glaces uniformes.

Le modèle à éléments finis doit être organisé de manière que l'emplacement des noeuds où se rassemblent les

éléments finis coïncide avec l'emplacement des capteurs. Autrement, l'étalonnage des capteurs risque de fausser les résultats.

La qualité des résultats obtenus a été généralement médiocre, notamment en raison des nombreuses interventions d'entretien qui ont empêché l'opérateur d'obtenir des enregistrements convenables des paramètres de fonctionnement du navire et des conditions reliées à l'environnement.

Il faut établir des normes ou des lignes directrices concernant les méthodes d'identification, d'enregistrement et de remplacement des rubans magnétiques; et éviter de confier la responsabilité du programme de saisie des données à plus d'un contractant.

Enfin, ni les capteurs placés à bâbord ni ceux qui se trouvaient au-dessus de la ligne d'eau n'ont été utiles. Ils l'auraient été autrement plus si on s'en était servi pour affiner le réseau extensométrique du panneau instrumenté et de l'élément de surface.

Nous fondant sur l'expérience acquise dans l'analyse des données obtenues à bord de l'ARCTIC lors de cette recherche et des recherches antérieures, nous recommandons les améliorations suivantes:

- archivage plus précis des temps d'enregistrement et du contenu des rubans;
- meilleure documentation concernant les circuits de filtrage;
- connaissance plus précise de l'emplacement de chaque capteur et de la fréquence de son remplacement;
- bien indiquer au début de l'enregistrement le capteur précis scruté;
- avoir des rubans de longueur uniforme et donc des temps d'enregistrement uniformes;
- pousser davantage la structuration du Répertoire général des données en vue de faciliter et d'accélérer la récupération des données qu'il contient.

9. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Conclusions

Les résultats de la recherche, fondés sur les données qui ont pu être réduites et analysées, sont les suivants:

- L'ensemble de la documentation rassemblée au cours des périples de l'ARCTIC entre 1979 et 1981 a enrichi nos connaissances concernant le comportement des cargos brise-glace et a débouché sur une meilleure compréhension du phénomène d'interaction coque-glace. À preuve, l'analyse des données sur la résistance de la coque a confirmé quelques-unes des hypothèses et des conclusions relatives à l'interaction coque-glaces auxquelles étaient arrivées les études faites pour rapprocher la Loi de la réalité.

- Les conditions environnementales observées lors des essais spécialisés n'ont, en général, pas été notées avec suffisamment de précision; elles n'ont pas été suffisamment variées pour permettre d'établir des liens de cause à effet entre les phénomènes observés. En outre, les restrictions imposées par la piètre disposition du réseau extensométrique ainsi que par le mode discontinu d'enregistrement ont fait que seule l'analyse statistique des données a pu donner des résultats utiles.

- La réponse de la coque aux charges dues à des glaces uniformes de première année a été la plus faible de toutes. Il a été constaté que les conditions glacielles n'ont guère eu d'effet sur les régimes de charge.

- Par rapport aux valeurs de pression dues à une glace uniforme, et prises comme référence, et pour un niveau de probabilité de 98 p. 100, les valeurs de pression observées sur une surface de 1,50 m^2 ont été les suivants:

1. Floes de plusieurs années	6,1 MPa (2,4 fois la pression de fréquence)
2. Glace fragmentée	5 MPa (2 fois)
3. Marche alternée	4,1 MPa (1,6 fois)
4. Giration dans une glace uniforme	3,4 MPa (1,4 fois)
5. Marche dans une glace uniforme	2,5 MPa (1 fois)

- Ces chiffres montrent que les règles de calcul basées sur les charges et pressions subies en marche dans une glace uniforme sont en réalité mal fondées. À noter que les valeurs de charge indiquées sont à ±50 p. 100 de précision près.

- La fréquence des impacts observés concorde avec les observations antérieures à l'égard de chacun des régimes pris en compte:

1. Floes de plusieurs années	28 impacts par heure
2. Glace fragmentée	16 impacts par heure
3. Marche alternée	35 impacts par heure
4. Giration dans une glace uniforme	351 impacts par heure
5. Marche dans une glace uniforme	74 impacts par heure

- Les cas de défaillance structurelle observés résultent de charges ayant atteint 23 MN (2 340 tonnes) et agissant sur une surface de 1,50 m^2, soit une pression moyenne de 15 MPa (2 200 lb/po^2), et attribuables à des collisions avec des floes de plusieurs années.

- Les taux de déformation observés sur le bordé extérieur ont été plus élevés que sur les membrures, le taux de déformation maximum enregistré ayant été de l'ordre de $10^{-2}s^{-1}$.

- L'emplacement choisi pour implanter le panneau instrumenté a été judicieux vu qu'il coïncide avec la surface la plus exposée.

- Les courbes d'isocontrainte montrent que dans 90 p. 100 des cas, les contraintes ont été inférieures à 60 p. 100 de la limite d'élasticité.

- La zone de renforcement de la coque précisée par la Loi coïncide bien avec celle où les risques d'éventuelles surcharges sont les plus élevés.

- Connaissant les valeurs de contrainte observées et utilisant la méthode statistique des valeurs extrêmes, on peut dire que la méthode de calcul de l'épaisseur des plaques de bordé préconisée par la Loi fait surgir une forte probabilité de déformation permanente. En effet, au bout de 48 heures de marche continue dans des glaces de plusieurs années à chaque périple, il y a eu entre 11 et 15 dépassements de la limite d'élasticité (déformations

mineures) et de 1 à 7 cas de déformations plastiques (déformations moyennes). La gamme des espérances de durabilité correspond à diverses distributions de probabilité, c'est là une évidence corroborée de plusieurs sources.

- La méthode de calcul stipulée à l'égard des membrures fait ressortir une marge de sécurité plus élevée que dans le cas des plaques. Au bout de vingt heures de marche alternée, plus éprouvante pour les membrures que pour les plaques, il y a eu un ou deux cas de dépassement de la limite d'élasticité, tandis qu'il faut entre 70 et 80 heures de marche alternée avant qu'il y ait risque de ruine due à la formation de trois charnières plastiques.

- Les faiblesses reconnues du système d'acquisition des données installé à bord de l'ARCTIC concernent tant le principe de base que la sélection et l'installation du matériel et des composants. Le nombre élevé d'interventions d'entretien ainsi que le mode de fonctionnement en discontinu ont empêché l'analyse approfondie de la réponse de la coque aux charges des glaces.

- L'endroit choisi pour implanter le panneau instrumenté a été généralement judicieux. Par contre, la répartition des capteurs a été mauvaise et il n'y en avait pas en nombre suffisant en certains endroits clés, l'étrave, par exemple.

- L'insuffisance des indications concernant les enregistrements a suscité beaucoup d'ennuis au moment de la réduction et de l'interprétation des données.

- Les capteurs à bâbord, séparés et isolés comme ils l'étaient, n'ont pas délivré d'information utile, notamment en ce qui concerne les charges des glaces qui sont des phénomènes localisés.

Recommandations

Considérations générales

- L'instrumentation de la coque doit être envisagée tôt dans le stade de la conception dans le but d'en faciliter l'installation, d'en augmenter la fiabilité et d'en prolonger la vie utile.

- La giration et les manoeuvres dans une glace uniforme provoquant des niveaux élevés de charge et de pression, phénomène dont l'étude devra être poussée de manière à pouvoir fixer les limites admissibles de ces manoeuvres.

- La chaîne de mesure doit être conçue en fonction des résultats recherchés.

- Étant donné que l'ARCTIC a été l'objet de recherches faites par plusieurs contractants, il y aurait lieu maintenant de procéder à la consolidation de l'information amassée, d'approfondir les convergences et les divergences mises en évidence et de tirer les conclusions qui s'imposent.

Conception

- La courbe de distribution des charges exercées sur l'étrave montre que l'épaule est la partie la plus chargée; son profil devra donc être dessiné de manière à réduire autant que possible les niveaux de charge.

- Plus les charges sont localisées, plus les plaques du bordé sont sollicitées, et plus les surfaces impactées sont grandes, plus le phénomène de pontage entre en jeu, délestant le bordé et chargeant les membrures. Néanmoins, ce phénomène ne devrait pas être pris en compte dans le dimensionnement des plaques du bordé, et surtout pas pour justifier des épaisseurs pour lesquelles les risques de défaillance seraient élevés en l'absence de ce phénomène.

- La fréquence propre naturelle des plaques de bordé devra être déterminée et comparée à la périodicité des impacts observés. Si elles devaient être proches l'une de l'autre, il y aura lieu de vérifier si le phénomène périodique en jeu n'a pas été intensifié par effet de résonance.

- Le dimensionnement des éléments de charpente devra prendre en compte des valeurs réalistes de forces agissantes et de surfaces impactées à l'étrave, compte tenu des relations connues entre pressions et surfaces.

- Les ordres de grandeur stipulés pour le dimensionnement des plaques de bordé devraient indiquer des valeurs minimums de calcul à être prises en compte, le critère essentiel étant le non-dépassement de la

limite d'élasticité stipulé dans l'article 5 de l'annexe VI de la Loi.

- L'instrumentation de la coque dans le but d'assurer le suivi des charges et des réponses doit faire partie intégrante de l'étude d'un navire.

Exploitation

- Il n'y a pas de relation contraignante entre charges des glaces et vitesse de marche étant donné que celle-ci se trouve être ralentie en proportion de l'épaisseur des glaces.

- Les charges et les pressions les moins élevées se constatent durant une marche continue dans une glace uniforme. Mais cet état de choses peut devenir dangereux si jamais le navire, avançant dans une glace peu épaisse à une vitesse relativement élevée, venait à heurter des floes de plusieurs années.

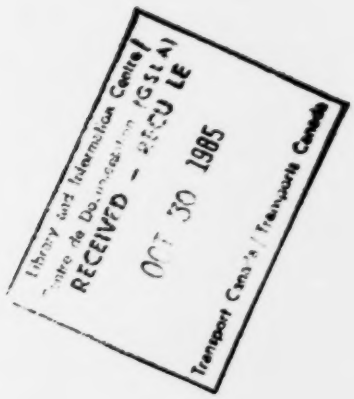
- Les risques de déformation permanente augmentent durant les manoeuvres et les girations, et surtout les marches alternées dans une glace uniforme, continue ou fragmentée.

- Des capteurs isolés les uns des autres font de piètres avertisseurs, et il serait dangereux de trop s'y fier puisque, même en l'absence de toute indication de danger, les risques de déformation localisée demeurent élevés.

- La saisie de données devrait toujours être complétée d'observations précises sur les conditions glacielles et les paramètres de fonctionnement du navire.

CA1
DTC 820
85
A67S
C.2

10. RÉFÉRENCES

[1] Glen, I., Nawwar, A., MV ARCTIC Structural, TP 5682E, ACL Interim Report 1500C, soumis au Centre de développement des transports, octobre 1984.

[2] «A Rationale Basis for the Selection of Ice Strengthening Criteria for Ships», Ships Structures Committee SSC 309.